第 37 卷第 6 期 生 态 学 报 Vol.37,No.6
2017 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201510292184
安睿,王凤友,于洪贤, 马成学.三环泡湿地浮游动物功能群季节变化及其影响因子.生态学报,2017,37(6):1851-1860.
An R, Wang F Y, Yu H X, Ma C X. Seasonal dynamics of zooplankton functional groups and their relationships with environmental factors in the sanhuanpao wetland reserve. Acta Ecologica Sinica,2017,37(6):1851-1860.

三环泡湿地浮游动物功能群季节变化及其影响因子

安 睿[1],王凤友[3],于洪贤[2], 马成学[2,*]
1 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040
2 东北林业大学野生动物资源学院, 哈尔滨 150040
3 贵州省教育厅, 贵阳 550003

摘要:为了研究寒区湿地浮游动物功能群的季节变化以及水环境等因素的影响,对淡水浮游动物进行了功能群划分,以北方寒冷地区沼泽型湿地三环泡国家级自然保护区为例,于 2014 年春季(5 月)、夏季(7 月)和秋季(9 月)对三环泡国家级自然保护区 15 个采样点进行了浮游动物采样,系统分析了浮游动物功能群的组成特征。结果表明:三环泡国家级自然保护区浮游动物功能群共划分为 7 个功能群,春季以功能群 RF 占优势,为 83.82%;夏季以功能群 RC、PF、RF 和 LCC 占优势,分别为34.15%,19.58%,18.49%和 10.54%;秋季以功能群 RC 和 RF 占优势,分别为 71.94%和 17.86%。浮游动物功能群季节变化表现为 RF→RC+PF+RF+LCC→RC+RF 的特点,表明春季功能群 RF 对浮游植物起到了很好的滤食作用,夏季和秋季功能群 RC 对功能群 PF 和 RF 捕食压力较大。通过 Pearson 相关分析和 RDA 多元统计分析表明,种间竞争、氯离子(Cl^-)、总氮(TN)、总无机碳(IC)和生物耗氧量(BOD_5)是影响三环泡国家级自然保护区浮游动物功能群的主要影响因素,除功能群 RF 外,其它功能群同氯离子(Cl^-)、总氮(TN)和总无机碳(IC)显著正相关,同生物耗氧量(BOD_5)显著负相关,SCF、MCF、MCC 和 LCC 由于食物竞争和捕食之间的关系表现出极显著的相关性,同为捕食关系的 RC 和 RF、PF 则没有表现出明显的相关性。种间竞争、浮游植物上行效应和营养盐是影响寒区沼泽型湿地浮游动物功能群季节变化和生物量的主要因素。

关键词:浮游动物;功能群;三环泡;湿地

Seasonal dynamics of zooplankton functional groups and their relationships with environmental factors in the sanhuanpao wetland reserve

AN Rui[1], WANG Fengyou[3], YU Hongxian[2], MA Chengxue[2,*]
1 *College of Forestry*, *Northeast Forestry University*, *Harbin* 150040, *China*
2 *College of Wildlife Resource*, *Northeast Forestry University*, *Harbin* 150040, *China*
3 *Guizhou Provincial Education Department*, *Guiyang* 550003, *China*

Abstract: We classified the zooplankton functional groups in a freshwater ecosystem, the Sanhuanpao Wetland Reserve, to determine the seasonal variation related to the environmental factors. We investigated the zooplankton in spring, summer, and autumn, and identified seven functional groups during the study period. Group RF (Rotifers filter feeders) was dominant in spring and was important to control the phytoplankton. Groups RC (Rotifers carnivore), PF (Protozoas filter feeders), RF, and LCC(Large copepods carnivore) were dominant in summer, whereas groups RC and RF were dominant in autumn. Group RC obviously inhibited the growth of PF and RF in summer and autumn. The results from Pearson and RDA analyses revealed that interspecificcompetition, Cl^- (Chloride ion), TN (Total nitrogen), IC (Total Inorganic

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2572015CA19);国家自然科学基金项目(41271106);中央高校基本科研业务费专项资金(2572014EA07-04)

收稿日期:2015-10-29; **网络出版日期**:2016-08-02

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: mch007@163.com

Carbon), and BOD_5(Biological oxygen demand) were the most important factors affecting zooplankton functional groups in the Sanhuanpao Wetland Reserve. Cl^-, TN, and IC showed a positive relationship with all the zooplankton functional groups except RF, whereas BOD_5 showed a negative relationship with all the zooplankton functional groups except RF. The functional groups SCF, MCF, MCC, and LCC had a positive relationship with each other, whereas group RC showed no relationship with groups PF and RF. Interspecific competition, bottom-up effects of phytoplankton and nutrients were the most important factors affecting the seasonal variation and biomass of zooplankton functional groups in cold region of marsh wetland.

Key Words: zooplankton; functional groups; Sanhuanpao Wetland Reserve; wetland

浮游动物是水生态系统中的次级生产力,是鱼虾的开口饵料,也是控制浮游植物的关键因素,是水生态系统食物链中的重要环节。尤其近年来,随着水体污染越来越严重,水体富营养化,蓝藻爆发时常发生,因此对于水体当中浮游动物研究显得尤为重要。传统方法通常以系统分类学为基础,将水生生物如浮游植物、浮游动物、底栖动物和鱼类等分成不同的分类类群,用来反映水质状况以及生物多样性,但是传统分类难以体现水生生物的生态功能[1],因此,生态学家提出了功能群的概念,功能群的物种特征同环境的联系更为紧密[1],通过功能群的研究,可以更直接的反映生态环境影响水生生物群落的生态过程,对于不同地理区域水生生物资源的管理更具科学价值,对于发展和检验群落生态学理论也十分重要,也可以更好的理解水生态系统及其生物多样性状况[2],并为运用模型进行定量化研究生态系统功能如能量流等打下一定的基础[3-5]。目前,国内对于浮游植物、底栖动物和鱼类功能群的划分以及分析较为深入,而关于浮游动物功能群的研究相对较浅,主要集中在海洋方面[6],对于淡水生态系统,尤其是寒区沼泽型湿地浮游动物功能群的划分以及分析还没有开展。

黑龙江省三环泡国家级自然保护区是三江平原最重要的湿地之一,其主要保护对象是内陆湿地生态系统及其栖息的珍稀水禽,担负着湿地生物多样性保护,实现湿地生态系统的保护和可持续发展的重要任务。该区域为三江平原典型湿地分布区之一,位于黑龙江省三江平原腹地,七星河中下游,富锦市境内南部;距富锦市区 75 km。保护区南与宝清县、西与友谊县相邻;保护区西南部与七星河国家级自然保护区隔七星河相望,保护区东南部隔挠力河与挠力河国家级自然保护区相接。近年来由于农田废水以及挠力河、七星河污水的影响,保护区部分水域水质明显恶化,水体富营养化严重,该文拟以三环泡国家级自然保护区为例,对淡水生态系统浮游动物功能群进行划分并分析,着重探讨湿地浮游动物功能群的结构及其数量的季节变化以及水环境等影响因素,为综合管理湿地提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 采样点

于 2014 年春季(5 月)、夏季(7 月)和秋季(9 月)对三环泡国家级自然保护区进行水样采集,根据三环泡国家级自然保护区核心区、缓冲区以及试验区规划以及周围的环境影响共设置了 15 个采样点(图 1),其中 S1 位于友谊县、宝清县和富锦县三县交界处实验区,S2—S6 位于保护区芦苇管护站核心区,S7 位于保护区芦苇管护站缓冲区,S8 位于中部振兴管护站缓冲区,S9—S10 位于大兴管护站实验区,S11—S13 位于大兴管护站核心区,S14—S15 位于大兴管护站缓冲区。

1.2 采样方法及水化学测定方法

浮游动物定性样品采用 25 号浮游生物网在水下 0.5m 处进行横“∞”字形捞取;原生动物与轮虫定量样品采用 1L 有机玻璃采水器采集 1L 水样,将采集的水样注入 1L 的塑料瓶中,立刻倒入 15‰体积的鲁哥氏液固定。在室内静置 48h 后,采用虹吸法除去上清液,浓缩至 30mL。原生动物定量取 0.1mL 用浮游植物计数框

在显微镜下全片计数,轮虫定量取 1mL 用浮游动物计数框在显微镜下全片计数。枝角类与桡足类定量样品采集采用 5L 有机玻璃采水器采集 20L 水样,用 25 号浮游生物网过滤,立刻加入 4% 体积的甲醛溶液固定,在显微镜下用浮游动物计数框观察样品中所有枝角类和桡足类[7]。原生动物根据《微型生物监测新技术》[8]鉴定;轮虫类根据《中国淡水轮虫志》[9]鉴定,枝角类根据《中国动物志》(淡水枝角类)[10]鉴定,桡足类根据《中国动物志》(淡水桡足类)[11]鉴定。轮虫生物量按体积法统计,枝角类和桡足类生物量分别按的体长、体重回归方程式计算[7]。透明度(SD)采用塞奇氏盘测定,电导率(COND)、氨氮(NH_4^+-N)、氯离子(Cl^-)、浊度(TURBID)采用 YSI-6600 多功能水质分析仪进行现场测定,总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD_{Mn})、生物耗氧量(BOD_5)、总碳(TC)、总有机碳(TOC)、总无机碳(IC)等水化学指标依据《水和废水监测分析方法》[12]测定。

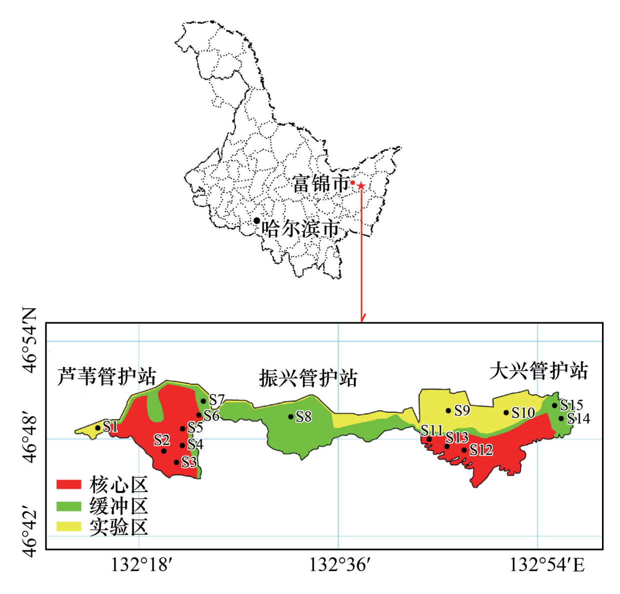


图 1　三环泡湿地保护区浮游动物采样点

Fig.1　Samples of zooplankton in Sanhuanpao wetland reserve

1.3　浮游动物功能群的划分

在国内外研究工作者的基础上,根据浮游动物的大小、摄食习性以及浮游动物之间的相互作用,将淡水生态系统浮游动物划分为原生动物滤食者 PF、原生动物捕食者 PC、轮虫滤食者 RF、轮虫捕食者 RC、小型浮游动物滤食者 SCF、小型浮游动物捕食者 SCC、中型浮游动物滤食者 MCF、中型浮游动物捕食者 MCC、大型浮游动物滤食者和大型浮游动物捕食者 LCC 10 个浮游功能群[13](表 1),但三环泡自然保护区浮游动物调查中并未发现原生动物捕食者 PC、小型浮游动物捕食者 SCC 和大型浮游动物滤食者 LCF,因此只划分为 7 个浮游动物功能群。

表 1　淡水浮游动物功能群分类

Table 1　Descriptor zooplankton functional groups in freshwater ecosystem

功能群 Functional groups	缩写 Abbreviation	大小/mm Size	摄食习性 Feeding habits
原生动物滤食者 Protozoas filter feeders	PF		滤食者,以细菌、藻类和有机质为食
原生动物捕食者 Protozoas carnivora	PC		捕食者,以小型原生动物为食
轮虫滤食者 Rotifers filter feeders	RF		滤食者,以细菌、藻类和有机质为食
轮虫捕食者 Rotifers carnivora	RC		捕食者,以原生动物、其它轮虫和小型甲壳动物等为食。
小型浮游动物滤食者 Small copepods and claocera filter feeders	SCF	<0.7	滤食者,以细菌、藻类、有机质和原生动物为食
小型浮游动物捕食者 Small copepods and claocera carnivora	SCC	<0.7	捕食者,以轮虫、枝角类、双翅目昆虫(摇蚊幼虫)、寡毛类为食
中型浮游动物滤食者 Middle copepods and claocera filter feeders	MCF	0.7—1.5	滤食者,以细菌、藻类、有机质和原生动物为食
中型浮游动物捕食者 Middle copepods and claocera carnivora	MCC	0.7—1.5	捕食者,以轮虫、枝角类、双翅目昆虫(摇蚊幼虫)、寡毛类为食
大型浮游动物滤食者 Large copepods carnivore	LCF	>1.5	滤食者,以细菌、藻类、有机质和原生动物为食
大型浮游动物捕食者 Large copepods carnivore	LCC	>1.5	捕食者,以轮虫、枝角类、双翅目昆虫(摇蚊幼虫)、寡毛类为食

1.4 数据分析

根据浮游动物功能群生物量计算 Bray-Cartis 相似性系数[14]，采用 SPSS 软件，应用 MDS 分析不同季节、不同采样点之间浮游动物功能群的差异性。浮游动物功能群通过 $\log_{10}(x+1)$ 进行处理使之更趋于正态分布后，采用 Pearson 相关分析研究不同浮游动物功能群之间的相互作用以及同水化学因子的关系。采用 Canoco for windows 4.5 软件进行 DCA 分析，发现 SD 值<3，因此对物种数据和相关环境因子数据进行 RDA 分析[15]。

2 结果

2.1 三环泡国家级自然保护区水环境特征

三环泡国家级自然保护区水环境因子见表 2，方差分析结果表明除了电导率外，其它环境因子均呈现明显的季节变化，春季透明度(SD)、氨氮(NH_4^+-N)、生物耗氧量(BOD_5)和总有机碳(TOC)明显高于其它季节，而氯离子(Cl^-)、浊度(NTU)、总氮(TN)、总磷(TP)、总碳(TC)和总无机碳(IC)则明显低于其它季节，夏季氯离子(Cl^-)和总氮(TN)较高，秋季总磷(TP)和化学耗氧量(COD_{Mn})明显高于其它季节，而水温(WT)和生物耗氧量(BOD_5)明显低于其它季节。

表 2 三环泡湿地保护区各季节环境因子平均值

Table 2 Averages of environmental variables in Sanhuanpao wetland reserve

水环境因子 Environmental Factors	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn
水温 Temperature/℃	22.96 ± 1.75	24.29 ± 0.91	14.57 ± 0.54
电导率 COND/(ms/m)	0.22 ± 0.06	0.27 ± 0.08	0.24 ± 0.08
氯离子 Cl^-/(mg/L)	9.8 ± 3.30	26.52 ± 9.85	23.87 ± 8.86
氨氮 NH_4^+-N/(mg/L)	0.039 ± 0.05	0.003 ± 0.002	0.002 ± 0.002
浊度 TURBID/NTU	19.97 ± 29.97	34.75 ± 27.31	31.28 ± 24.58
透明度 Secchi depth/cm	80.53 ± 22.59	64.33 ± 35.29	70.77 ± 38.82
总氮 TN/(mg/L)	0.75 ± 0.42	3.51 ± 2.15	1.97 ± 0.72
总磷 TP/(mg/L)	0.047 ± 0.049	0.093 ± 0.064	0.196 ± 0.274
化学耗氧量 COD_{Mn}/(mg/L)	5.63 ± 2.43	5.25 ± 1.27	6.94 ± 2.05
生物耗氧量 BOD_5/(mg/L)	4.31 ± 1.48	2.06 ± 0.75	1.61 ± 0.54
总有机碳 TOC/(mg/L)	18.56 ± 8.15	14.83 ± 2.96	16.87 ± 2.46
总碳 TC/(mg/L)	37.65 ± 17.29	51.2 ± 11.96	55.01 ± 6.63
总无机碳 IC/(mg/L)	19.11 ± 9.21	36.37 ± 9.10	38.14 ± 6.64

2.2 MDS 差异性分析

从时间分布来看，芦苇管护站 1#、2#、3#、4#和 5#季节差性较小，尤其是春季和夏季，均以功能群 RF 为主，而其它采样点季节差异性较大。从水平分布来看，春季各采样点没有明显差异，除 7#、8#和 9#外，其余采样点均以功能群 RF 占优势，夏季和秋季各采样点差异性较大(图 2)。A3、A4、A11、A12、A15 以功能群 PF 为主，SU10、SU11、SU12、A6、A7 以功能群 PF/RF 为主，SU7、A8、A14 以功能群 RC/RF 为主，S1、S2、S3、S4、S5、S6、S10、S11、S12、S13、S14、S15、SU2、SU3、SU4、SU5、A5、A9、A10、A13 均以功能群 RF 为主，S7、SU6、SU8、SU9、SU13、SU14 以功能群 LCC/SCF/RF/MCC 为主，S8、A2 以功能群 MCF 为主，A1 以功能群 LCC 为主，S9 以功能群 RF/MCC/SCF 为主。其季节差异主要是体现在营养盐的变化上。夏季和秋季营养盐明显高于春季，营养盐的增加有利于浮游植物的增长，间接影响到浮游动物，可能是造成浮游动物功能群差异的主要原因之一(图 2)。

2.3 三环泡浮游动物功能群的季节分布

三环泡国家级自然保护区湿地浮游动物共鉴定出 4 门 28 种，共划分为 7 个功能群(表 3)。通过不同季节浮游动物功能群平均生物量可以看出，春季以功能群 RF 占优势，为 83.82%；夏季以功能群 RC、PF、RF 和 LCC 占优势，分别为 34.15%，19.58%，18.49%和 10.54%；秋季以功能群 RC 和 RF 占优势，分别为 71.94%和 17.86%(图 3，图 4)。

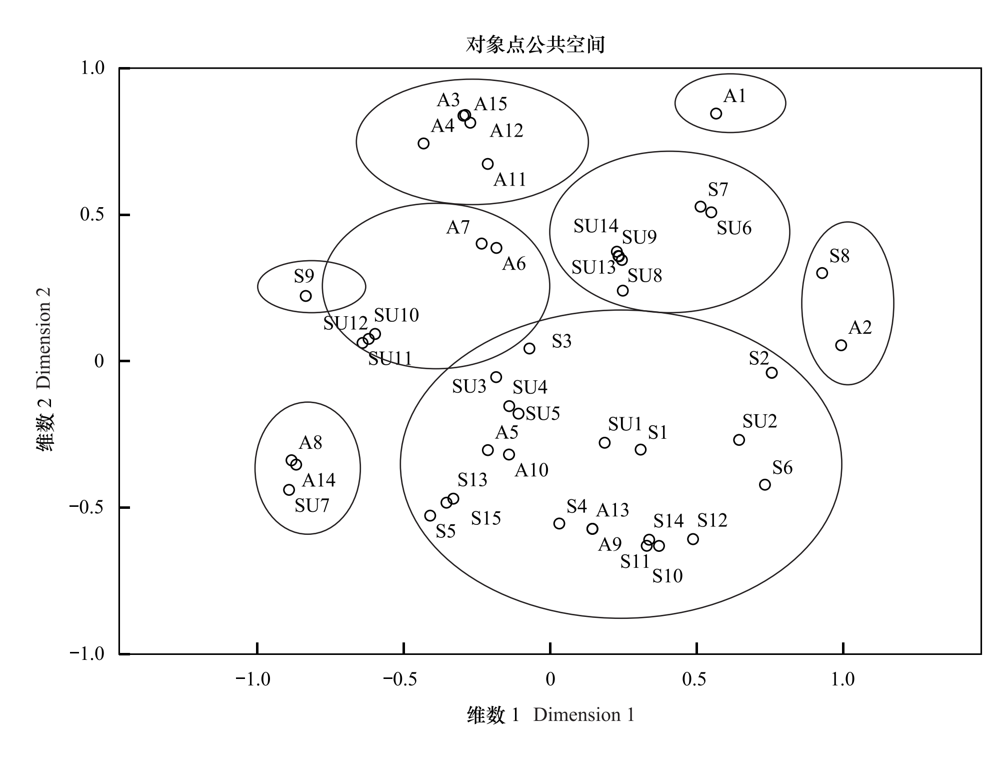


图 2　三环泡湿地保护区浮游动物功能群生物量的 MDS 排序分析

Fig.2　MDS ordination of zooplankton functional groups in Sanhuanpao wetland reserve

S: 春季;SU: 夏季;A: 秋季

表 3　三环泡湿地保护区浮游动物功能群

Table 3　Descriptor of zooplankton functional groups in Sanhuanpao Wetland Reserve

种类 Speicies	门类 Class	功能群 Functional groups
旋回侠盗虫 *Strombidium gyrans*	原生动物 Protozoa	PF
绿急游虫 *Strombidium viride*	原生动物 Protozoa	PF
梨形四膜虫 *Tetrahymena priformis*	原生动物 Protozoa	PF
沟钟虫 *Vorticella convallaria*	原生动物 Protozoa	PF
锥形瓶口虫 *Lagynophrya mucicola*	原生动物 Protozoa	PF
方形臂尾轮虫 *Brachionus quadridentatus*	轮虫 Rotifera	RF
螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*	轮虫 Rotifera	RF
矩形龟甲轮虫 *Keratella quadrata*	轮虫 Rotifera	RF
针簇多肢轮虫 *Polyarthra trigla*	轮虫 Rotifera	RF
长三肢轮虫 *Filinia longisela*	轮虫 Rotifera	RF
前节晶囊轮虫 *Asplanchna priodonta*	轮虫 Rotifera	RC
沟痕泡轮虫 *Ponpholyx sulcata*	轮虫 Rotifera	RF
异尾轮虫 sp*Trichocerca* sp.	轮虫 Rotifera	RF
红眼旋轮虫 *Philodina erythrophthalma*	轮虫 Rotifera	RF
顿齿单趾轮虫 *Monostyla crenata*	轮虫 Rotifera	RF
囊形单趾轮虫 *Monostyla bulla*	轮虫 Rotifera	RF
卵形鞍甲轮虫 *Lepadella ovalis*	轮虫 Rotifera	RF
奥艾奥腔轮虫 *Lecane ohioensis*	轮虫 Rotifera	RF
蹄型腔轮虫 *Lecane ungulata*	轮虫 Rotifera	RF
长额象鼻溞 *Bosmina longirostris*	枝角类 Cladocera	SCF
大型溞 *Daphnia magna*	枝角类 Cladocera	LCF
尖额溞属 sp*Alona* sp.	枝角类 Cladocera	MCF
透明薄皮溞 *Leptodora kindtii*	枝角类 Cladocera	LCC
长肢秀体溞 *Diaphanosoma leachtenbergianum*	枝角类 Cladocera	MCF
英勇剑水蚤 *Cyclops strenuus*	桡足类 Copepoda	LCC
粗壮温剑水蚤 *Thermocyclops dybowskii*	桡足类 Copepoda	MCC
爪哇小剑水蚤 *Microcyclops javanus*	桡足类 Copepoda	SCF
猛水蚤 Harpacticidae	桡足类 Copepoda	SCF

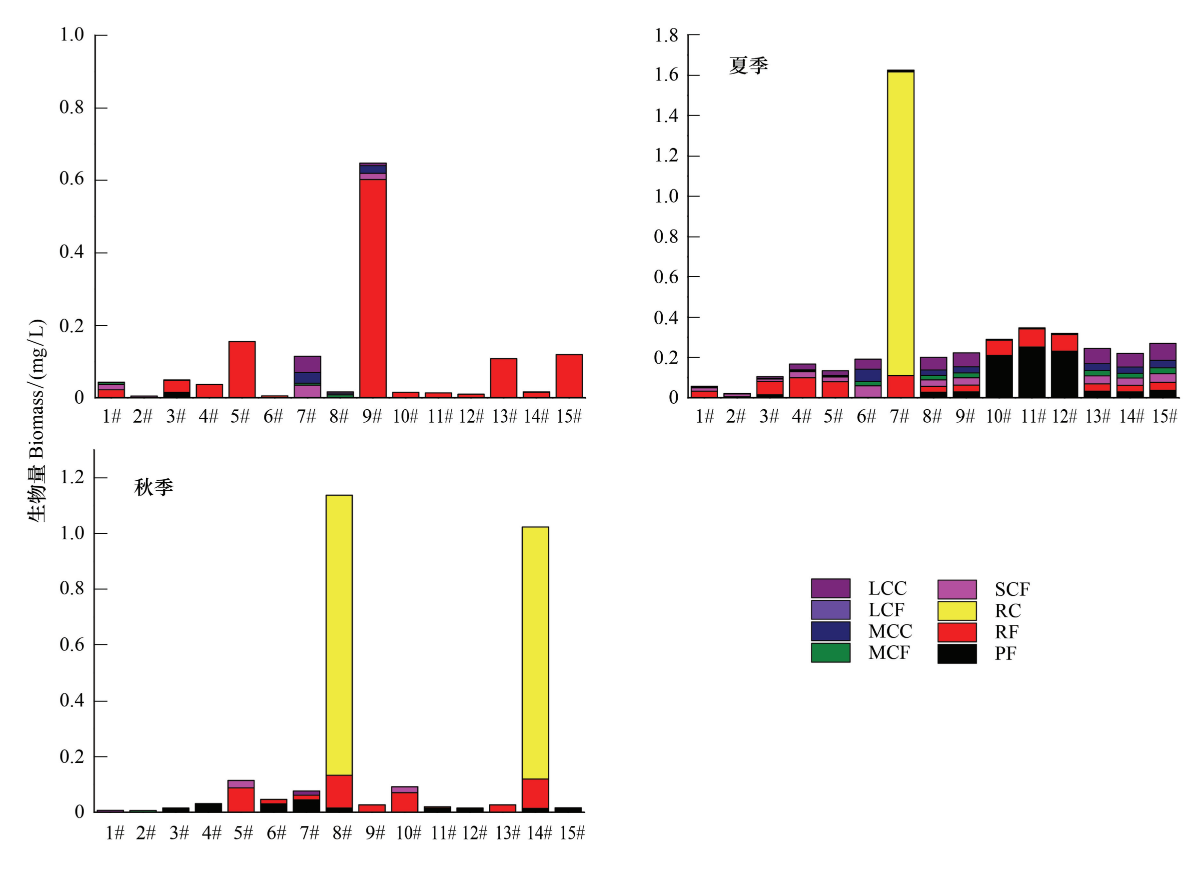


图 3 浮游植物功能群生物量水平分布

Fig.3 Distribution of phytoplankton functional groups biomass

2.4 浮游动物功能群之间的相互作用及同水环境因子的关系

2.4.1 不同浮游动物功能群同其它浮游动物功能群及水环境因子的 Pearson 相关分析

从表 4、表 5 可以看出,浮游动物功能群生物量与大多数水环境因子不具有明显的相关性,仅同氯离子(Cl^-)和电导率(COND)相关,功能群 RC 同氯离子(Cl^-)显著正相关,功能群 MCF 和 LCC 同电导率(COND)显著正相关。而浮游动物功能群之间的相关性更为明显,SCF、MCF、MCC 和 LCC 之间均为极显著正相关,功能群 PF 和 RF 同其它功能群和水环境没有明显相关性。

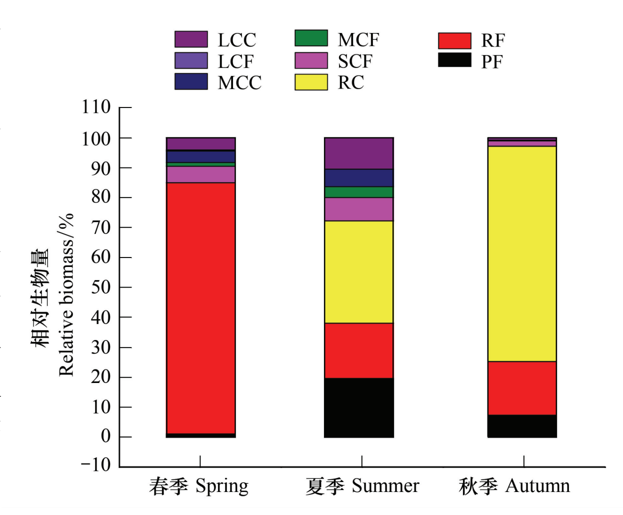


图 4 三环泡湿地保护区浮游动物功能群季节平均相对生物量

Fig.4 Mean biomass of main phytoplankton functional groups in Sanhuanpao wetland reserve

2.4.2 浮游动物功能群同水环境因子的 RDA 分析

从图 4 可以看出,RDA 结果表明第一轴、第二轴共解释了属种累积方差值的 27.0%,所有水环境因子仅解释了 27.3%的功能群变化信息。在第一轴, Cl^-为最主要正相关因子(0.6457),其次为正相关因子总氮 TN(0.6188),负相关因子透明度 SD(−0.4660)也具有较明显的相关性;在第二轴,生物耗氧量(BOD_5)为最主要正相关因子(0.5731),其次为负相关因子总无机碳 IC(−0.5643),电导率(COND)、氯离子(Cl^-)、NH_4^+ 和总碳(TC)也具有较明显相关性。除功能群 RF 同水环境因子相关性较小外,Cl^-、TN、COND、TC 和 IC 同其它浮游

动物功能群呈正相关,而 BOD_5、SD 和 NH_4^+ 同其它浮游动物功能群呈负相关,其它水环境因子同浮游动物功能群没有明显相关性。

表 4　不同浮游动物功能群同其它浮游动物功能群的 Pearson 相关分析

Table 4　Significant Pearson correlation between the biomass of zooplankton functional groups ($n=45$)

功能群 Functional groups	PF	RF	RC	SCF	MCF	MCC	LCF	LCC
PF	1	−0.014	−0.047	−0.144	−0.043	−0.015	−0.062	−0.006
RF	−0.014	1	0.145	0.119	−0.123	0.154	−0.085	−0.03
RC	−0.047	0.145	1	−0.114	−0.1	−0.041	−0.041	−0.1
SCF	−0.144	0.119	−0.114	1	0.727**	0.831**	−0.098	0.787**
MCF	−0.043	−0.123	−0.1	0.727**	1	0.785**	0.166	0.847**
MCC	−0.015	0.154	−0.041	0.831**	0.785**	1	−0.066	0.826**
LCF	−0.062	−0.085	−0.041	−0.098	0.166	−0.066	1	−0.033
LCC	−0.006	−0.03	−0.1	0.787**	0.847**	0.826**	−0.033	1

* 在 0.05 水平显著相关; ** 在 0.01 水平上显著相关

表 5　不同浮游动物功能群同水环境因子的 Pearson 相关分析

Table 5　Significant Pearson correlation between the biomass of zooplankton functional groups and 14 environmental variables ($n=45$)

功能群 Functional groups	水温 TEP/℃	电导率 COND/(ms/um)	氯离子 Cl^-/(mg/L)	氨氮 NH_4^+-N(/mg/L)	浊度 TURBID/NTU	透明度 SD/cm	总氮 TN/(mg/L)	总磷 TP/(mg/L)	化学耗氧量 COD_M/(mg/L)$_n$	生物耗氧量 BOD_5/(mg/L)
PF	0.067	0.064	0.141	−0.153	−0.076	0.072	0.081	0.04	−0.129	−0.293
RF	0.05	−0.076	−0.017	0.139	−0.125	−0.079	−0.008	−0.111	0.044	0.213
RC	0.057	0.192	0.348*	−0.108	0.037	−0.245	0.333	0.07	0.044	−0.109
SCF	0.306	0.333	0.119	−0.122	0.049	−0.203	0.29	−0.056	−0.077	0.069
MCF	0.293	0.395*	0.145	−0.119	0.102	−0.286	0.242	−0.023	−0.234	−0.069
MCC	0.303	0.252	0.039	−0.08	0.088	−0.257	0.214	−0.005	−0.268	0.076
LCF	0.152	0.092	−0.184	0.093	−0.104	0.03	−0.115	−0.085	0.052	0.238
LCC	0.265	0.341*	0.214	−0.119	0.062	−0.283	0.153	−0.033	−0.23	−0.03

* 在 0.05 水平显著相关; ** 在 0.01 水平上显著相关

表 6　排序轴特征值、种类与环境因子排序轴的相关系数

Table 6　Redundancy analysis results for zooplankton functional groups

轴序 Axes	特征值 Eigenvalues	种类-环境相关性 Species-environment correlations	物种数据累计变化百分率/% Cumulative percentage variance of species data	物种-环境相关性累计变化百分率/% Cumulative percentage variance of species-environment relation
1	0.245	0.533	24.5	89.8
2	0.025	0.479	27.0	98.9
3	0.002	0.393	27.2	99.6
4	0.001	0.251	27.3	99.9

3　讨论

3.1　三环泡国家级自然保护区浮游动物功能群的季节变化

目前,国内对热带、亚热带、温带地区湖泊、水库、河流浮游动物季节变化研究较多[16-21],而对于寒区湿地研究的还相对较少[22-23],对于沼泽型湿地还没有深入研究。浮游动物的季节变化主要受水温、营养盐、浮游植物的上行效应、鱼类摄食的下行效应、水文变化、种间竞争等影响[19,24]。热带、亚热带地区受温度影响较小,浮游动物季节变化不显著[16],季节变化主要受鱼类摄食的下行效应所决定,鱼类摄食压力大的水体浮游

动物生物量以小型的轮虫和小型枝角类为主[25]，鱼类摄食压力小的水体以大型的枝角类和桡足类为主[16]。温带地区浮游动物的季节变化受温度和营养盐影响较为明显，枝角类和桡足类同水温具有明显的正相关性[26]，随着夏季水温的升高，枝角类和桡足类会逐渐增多，而水体的富营养化则会导致浮游动物小型化[24]，富营养水体全年以小型的轮虫[25]和小型枝角类[26]占优势。影响寒区湿地浮游动物季节变化的因素还不十分清楚，从浮游动物门类角度来看，三环泡国家级自然保护区浮游动物季节变化不显著，3 个季节均以轮虫占优势，但从功能群划分角度来看，其功能群季节变化显著(图 4)，呈现春季以功能群 RF 占优势，到夏季以 RC、PF、RF 和 LCC 占优势，再到秋季以 RC 和 RF 占优势的特征变化。功能群 RF 主要由耐低温、滤食性的针簇多肢轮虫、螺形龟甲轮虫等组成，是滤食浮游植物的主要功能群。浮游动物功能群 RC 仅由捕食性的前节晶囊轮虫组成，在夏季生物量最高的 7#、秋季生物量最高的 8#和 14#采样点均占优势，说明夏季和秋季功能群 RC 对功能群 PF 和 RF 捕食压力较大。功能群 PF 仅由旋回侠盗虫组成，以藻类、细菌和碎屑为食，主要生活在贫营养型水体[8]，在秋季 3#、4#、11#、12#和 15#采样点占优势，说明秋季这 5 个采样点水质相对较好。

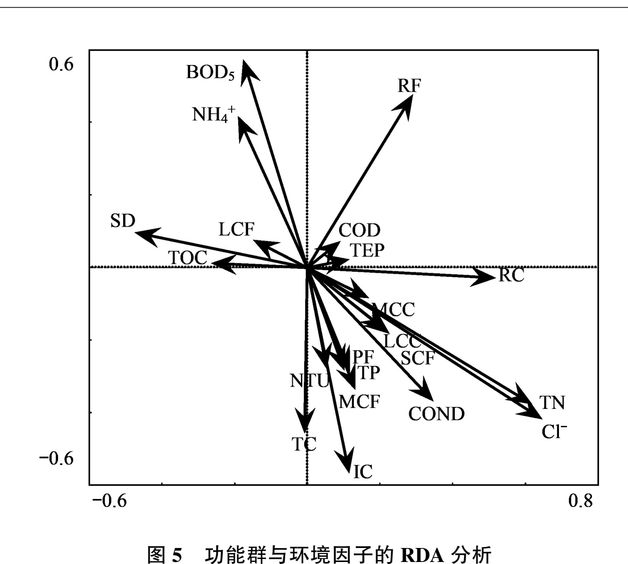


图 5　功能群与环境因子的 RDA 分析

Fig.5　Functional groups-environment biplot RDA

3.2　浮游动物功能群之间的相互作用及其与水环境因子的关系

温度、营养盐、浮游植物的上行效应、鱼类摄食的下行效应、种间竞争等是影响浮游动物生长的主要因素，同样也影响浮游动物功能群的分布。在热带、亚热带地区，温度不是影响浮游动物的主要因素，鱼类摄食的下行效应是主要因素。而在温带地区，温度和营养盐是主要的环境因子，对于寒区浮游动物的影响因素还不是十分清楚。对于寒区沼泽型湿地的三环泡国家级自然保护区，通过 RDA 分析结果来看(图 5)，温度也不是主要的环境因子，氯离子、总氮、生物耗氧量和总无机碳是影响浮游动物功能群的主要水环境因子。除功能群 RF 外，其它功能群同氯离子、总氮和总无机碳显著正相关，而同生物耗氧量显著负相关。三环泡国家级自然保护区虽然没有旅游等人为干扰，但上游七星河、挠力河农田废水以及周围的农田废水会导致夏季和秋季氯离子和总氮显著升高。氯离子和总氮的升高会促进浮游植物的生长，通过浮游植物的上行效应，进而间接影响浮游动物的生长。同理，无机碳对浮游植物的影响也间接影响了浮游动物的生长。碳是构成浮游植物的主要元素之一，浮游植物是碳循环的主要环节，浮游植物的固碳能力在全球碳循环中起着关键作用，但却未被科学家充分了解，在三环泡国家级自然保护区无机碳也是影响浮游植物功能群的主要环境因子之一(另文发表)，在夏季，浮游植物是浮游动物最重要的碳源[27]，因此，夏季出现的浮游动物功能群同总无机碳显著正相关。生物耗氧量 BOD_5是由水中好氧性微生物引起的，通常反映水体当中有机污染物的含量，BOD_5小于 1mg/L 表示清洁水体，大于 4mg/L 表示水体受到有机物的污染[28]，三环泡国家级保护区全年 BOD_5平均值为 2.66 mg/L，说明三环泡国家级保护区受到一定的有机物污染。从图 5 来看，除了浮游动物功能群 RF 外，所有浮游动物功能群同 BOD_5显著负相关，说明三环泡国家级自然保护区浮游动物功能群不耐受有机物污染。而功能群 RF 除了滤食浮游植物外，还可以滤食细菌和碎屑[29]，浮游植物的上行效应不明显，同时还具有耐低氧的能力，因此同水环境因子没有明显的相关性。

通过表 6 发现，RDA 结果显示前 2 个轴共解释浮游动物功能群变化的 27.0%，同不同学者对热带水体，如习丽红等[16]对大沙湾水库(11%)和苗藤等[25]对惠州西湖(34.6%)研究结果相类似。这说明除了水环境因子外，还有其它因素影响浮游动物功能群。国内对于浮游动物的研究更多的侧重于水环境因子的影响[30-32]，而往往忽视了浮游动物之间的相互作用。该文 Pearson 相关分析表明，种间竞争也是影响浮游动物功能群的

主要因素。通过浮游动物功能群进一步的划分,发现虽然浮游动物功能群 PF、RF、RC 和 LCF 同其它浮游动物功能群没有显著的相关性,但功能群 SCF、MCF、MCC 和 LCC 之间具有极显著的相关性。刁丽红等[16]对热带富营养水库研究也发现轮虫同枝角类没有显著相关性,竞争强度较弱,而 SCF、MCF、MCC 和 LCC 由于饵料竞争和捕食之间的关系则表现为极显著的相关性,同为捕食关系的 RC 和 RF、PF 则没有表现出明显的相关性。

4　结论

(1)根据浮游动物的大小、摄食习性以及浮游动物之间的相互作用,将淡水生态系统浮游动物划分为 10 个功能群,三环泡湿地保护区共发现 7 个功能群, 从不同季节浮游动物功能群生物量来看,春季以功能群 RF 占优势,夏季以功能群 RC、PF、RF 和 LCC 占优势,秋季以功能群 RC 和 RF 占优势,功能群 RC 和 RF 是三环泡湿地保护区浮游动物最为重要、最有代表性的功能群。本研究对于淡水生态系统,尤其是北方寒区沼泽型湿地保护区浮游动物功能群的划分以及水生态系统的管理和保护具有一定的借鉴意义。

(2)影响三环泡国家级自然保护区浮游动物功能群的因素主要为浮游动物功能群之间的相互作用和水环境因子。功能群 RF 同水环境因子和其它功能群没有明显的相关性,而其它功能群同氯离子、总氮、总无机碳显著正相关,同生物耗氧量显著负相关。SCF、MCF、MCC 和 LCC 由于饵料竞争和捕食之间的关系则表现为极显著的相关性,同为捕食关系的 RC 和 RF、PF 则没有表现出明显的相关性。

参考文献(References):

[1] Hood R R, Laws E A, Armstrong R A, Bates N R, Brown C W, Carlson C A, Chai F, Doney S C, Falkowski P G, Feely R A, Friedrichs M A M, Landry M R, Moore J K, Nelson D M, Richardson T L, Salihoglu B, Schartau M, Toole D A, Wiggert J D. Pelagic functional group modeling: progress, challenges and prospects. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2006, 53(5/7): 459-512.

[2] Hoeinghaus D J, Winemiller K O, Agostinho A A. Landscape-scale hydrologic characteristics differentiate patterns of carbon flow in large-river food webs. Ecosystems, 2007, 10(6): 1019-1033.

[3] Le Quéré C, Harrison S P, Prentice I C, Bultenhuis E T, Aumont O, Bopp L, Claustre H, Da Cunha L C, Geider R, Giraud X, Klaas C, Kohfeld K E, Legendre L, Manizza M, Platt T, Rivkin R B, Sathyendranath S, Uitz J, Watson A J, Wolf-Gladrow D. Ecosystem dynamics based on plankton functional types for global ocean biogeochemistry models. Global Change Biology, 2005, 11(11): 2016-2040.

[4] Araújo J N, Mackinson S, Stanford R J, Sims D W, Southward A J, Hawkins S J, Ellis J R, Hart P J B. Modelling food web interactions, variation in plankton production, and fisheries in the western English Channel ecosystem. Marine Ecology Progress Series, 2006, 309: 175-187.

[5] Ichinokawa M, Takahashi M M. Size-dependent carbon flow in the epipelagic food web of the Western Equatorial Pacific. Marine Ecology Progress Series, 2006, 313: 13-26.

[6] Sun S, Huo Y Z, Yang B. Zooplankton functional groups on the continental shelf of the yellow sea. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2010, 57(11-12): 1006-1016.

[7] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.

[8] 沈韫芬, 章宗涉, 龚循矩, 顾曼如, 施之新, 魏印心. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.

[9] 王家楫, 中国科学院水生生物研究所. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1961.

[10] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志-节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类. 北京: 科学出版社, 1979.

[11] 沈嘉瑞, 戴爱云, 宋大祥. 中国动物志-节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类. 北京: 科学出版社, 1979.

[12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.

[13] 赵文. 水生生物学. 北京: 中国农业出版社, 2005.

[14] Bray J R, Curtis J T. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. Ecological Monographs, 1957, 27(4): 325-349.

[15] Xiao L J, Wang T, Hu R, Han B P, Wang S, Qian X, Padisák J. Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir. Water Research, 2011, 45(16): 5009-5019.

[16] 刁丽红, 李慧明, 林秋奇, 韩博平. 热带富营养水库敞水区浮游动物群落结构与季节变化: 以广东大沙河水库为例. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1049-1058.

[17] 曾海逸, 钟萍, 赵雪枫, 李超, 何小林, 刘正文. 热带浅水湖泊后生浮游动物群落结构对生态修复的响应. 湖泊科学, 2016, 28(1):

170-177.
[18] 任晶晶, 林秋奇, 韩博平. 热带水库敞水区轮虫种类组成与数量结构——基于海南 7 座典型水库的分析. 湖泊科学, 2010, 22(2): 272-280.
[19] 卢慧斌, 陈光杰, 陈小林, 刘晓东, 顾兆炎, 张虎才, 赵帅营, 陈丽, 段立曾, 张自强. 上行与下行效应对浮游动物的长期影响评价——以滇池与抚仙湖沉积物象鼻溞(*Bosmina*)为例. 湖泊科学, 2015, 27(1): 67-75.
[20] 林青, 由文辉, 徐凤洁, 俞秋佳, 余华光. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. 生态学报, 2014, 34(23): 6918-6929.
[21] 李强, 田华, 姜民, 蔡文婕, 曹玥. 淀山湖浮游动物群落结构特征及其影响因子. 水生态学杂志, 2015, 36(4): 69-77.
[22] 赵菲, 于洪贤, 马成学, 宋俊霖. 应用浮游动物群落结构评价扎龙自然保护区的水质现状. 水产学杂志, 2013, 26(1): 41-55.
[23] 鞠永富, 于洪贤, 于婷, 姜明, 袁宇翔, 冯宇墨. 小兴凯湖浮游动物丰度和水质评价. 湿地科学, 2015, 13(5): 649-652.
[24] 杨宇峰, 王庆, 陈菊芳, 庞世勋. 河口浮游动物生态学研究进展. 生态学报, 2006, 26(2): 576-585.
[25] 苗滕, 高健, 陈炳辉, 刘正文. 惠州西湖生态修复对浮游甲壳动物群落结构的影响. 生态科学, 2013, 32(3): 324-330.
[26] 温周瑞, 谢平. 太湖梅梁湾、贡湖湾水质与浮游甲壳动物密度季节变化. 长江大学学报: 自然科学版, 2013, 10(17): 36-51.
[27] Perissinotto R, Walker D R, Webb P, Wooldridge T H, Bally R. Relationships between zoo-and phytoplankton in a warm-temperate, semi-permanently closed estuary, South Africa. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, 51(1): 1-11.
[28] 姚清晨. COD 和 BOD5 相关关系及其在环境监测中的应用. 太原科技, 2009, 184(5): 80-81, 84-84.
[29] Nilssen J P. Tropical lakes-functional ecology and future development: the need for a process-orientated approach. Hydrobiologia, 1984, 113(1): 231-242.
[30] 王博, 廖剑宇, 刘全儒, 江源. 东江干流浮游动物群落结构特征及与水质的关系. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2013, 49(6): 608-612.
[31] 李秋华, 温远志, 杨卫诚, 欧腾, 高廷进, 张垒, 魏刚. 贵州百花湖麦西河河口后生浮游动物群落结构及与环境因子的关系. 湖泊科学, 2013, 25(4): 531-538.
[32] 刘忱, 黄燕, 刘瑜, 邵晓阳. 东苕溪夏季浮游动物群落结构及水环境的初步研究. 杭州师范大学学报: 自然科学版, 2015, 14(5): 498-506.